

PROYECTO DIRIGIDO

**MODELACIÓN FÍSICA EN CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA DE UN SUELO
MEJORADO CON COLUMNAS DE SUELO-CEMENTO: APLICACIÓN
TERRAPLÉN.**



ELABORADO POR:

LILIANA CAMILA DELGADILLO OTÁLORA

DIRIGIDO POR:

ING. LINA XIMENA GARZÓN ÁVILA

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

24 DE MAYO 2022

BOGOTÁ D.C

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivo general.....	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
3. MARCO TEÓRICO	5
3.1 Estabilización de los suelos.....	5
3.1.1 Métodos de estabilización físicos.....	5
3.1.2 Métodos de estabilización químicos.....	6
○ Método de estabilización suelo-cemento (Soil Mixing).....	6
3.2 Modelación física en centrífuga geotécnica	8
3.3 Modelación física de suelos mejorados con columnas suelo-cemento.....	10
4. METODOLOGÍA.....	13
4.1 Modelación física de suelos mejorados con columnas suelo-cemento.....	13
4.2 Elección de la mezcla de suelo para los terraplenes y mezcla suelo-cemento para las columnas	14
4.3 Proceso constructivo y ensayo en centrífuga de los modelos.....	15
- Modelo 1 – Terraplén sin refuerzo	15
- Modelo 2 – Terraplén con refuerzo	17
- Etapa 1.....	17
- Etapa 2.....	20
4.4 Caracterización de la resistencia de la mezcla suelo – cemento	22
4.5 Análisis de imagen de los modelos.....	24
- Modelo 1 – Terraplén sin refuerzo	24
- Modelo dos – Terraplén con refuerzo	26
- Comparación de la cara A de los dos modelos	28
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	29
BIBLIOGRAFÍA.....	30

1. INTRODUCCIÓN

Los suelos blandos se caracterizan por su baja capacidad portante y resistencia al corte lo cual ocasiona importantes inconvenientes de estabilidad cuando se realizan construcciones y obras geotécnicas, es por ello que es necesario realizar mejoramientos al suelo de fundación ya sean químicos o físicos para aumentar las capacidades mecánicas del suelo reduciendo su deformabilidad e incrementando su estabilidad. Dichos análisis se llevan a cabo por medio de modelaciones numéricas o físicas siendo esta última el objeto de estudio del presente trabajo dirigido, en donde se llevará a cabo la construcción de columnas suelo – cemento con el tratamiento in situ “Deep Soil Mixing” por medio del método húmedo que busca mejorar las propiedades del suelo base frente a esfuerzos aplicados.

Existe muy poca investigación en modelación física a escala reducida en centrífuga geotécnica sobre cómo modelar un suelo blando mejorado con columnas suelo-cemento sobre el cual se construirá un terraplén y observar las diferencias entre el efecto de la falla del terraplén del suelo con mejoramiento y del suelo sin mejoramiento.

Se construyeron dos modelos de terraplén con las mismas características geométricas con el fin de comparar el comportamiento del suelo sin reforzar y reforzado con columnas suelo – cemento. Para la construcción de esos modelos se utilizó una mezcla de caolín y bentonita que posteriormente se sometió a un proceso de consolidación unidimensional hasta alcanzar un esfuerzo de 25kPa. Una vez el proceso de consolidación terminó, se les dio forma a los dos modelos (con y sin columnas suelo – cemento) y se realizó el ensayo en la centrífuga geotécnica de la universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, donde se busca someter el modelo a escala reducida a campos gravitacionales para lograr simular los mismos esfuerzos y deformaciones que tendría el prototipo.

Finalmente, por medio del análisis de imagen para los dos modelos se pudo concluir que se logró una estabilización eficiente del suelo blando, ya que se disiparon totalmente las superficies de falla presentes en el suelo base localizándose únicamente en el terraplén siendo esta el área sin refuerzo, así mismo se obtuvo una mezcla suelo – cemento – agua con una resistencia mayor a 500kPa para las columnas construidas, acordes con los valores establecidos por artículos académicos de acuerdo a las relaciones de material utilizadas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Definir el método constructivo de un modelo a escala reducida de un suelo blando mejorado con columnas suelo-cemento sobre el cual se construirá un terraplén y estudiar los mecanismos de falla del terraplén sobre el suelo con y sin refuerzo.

2.2 Objetivos específicos

- Probar diferentes maneras de construir un suelo mejorado con columnas suelo-cemento para ser probado en la centrífuga geotécnica.
- Determinar la distribución geométrica de las columnas suelo-cemento en el modelo teniendo en cuenta las condiciones de frontera.
- Medir las propiedades mecánicas de las columnas suelo-cemento por medio del ensayo de compresión para determinar la resistencia alcanzada.
- Realizar el análisis de imágenes de los modelos fallados para determinar el mecanismo de falla de los terraplenes sobre el suelo sin mejoramiento y con mejoramiento.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Estabilización de los suelos

El suelo es un conjunto de partículas heterogéneas anisotrópicas y está compuesto por minerales, materia orgánica, aire y agua. Estos suelos son sometidos a un estado de esfuerzos lo cual les da unas propiedades de estado y por ende unas propiedades de resistencia y deformación; algunos suelos tienen una baja capacidad portante y es por esto que existen diversos métodos de estabilización para mejorarlos y sean aptos para ser suelos de fundación en obras civiles.

La estabilización de los suelos es fundamental en la ingeniería civil ya que permite mejorar su capacidad portante, disminuir asentamientos y asegurar un buen factor de seguridad a las diferentes estructuras geotecnias que se vayan a construir. Se entiende por un suelo estable aquel que a través de ciertas manipulaciones o tratamientos físicos y/o químicos muestra una mejora en sus propiedades obteniendo así un suelo base estable capaz de resistir grandes cargas evitando grandes deformaciones y se vuelve ideal para soportar condiciones climáticas severas (Yepes V et al, 2004).

Durante toda la historia de la ingeniería se han desarrollado distintas técnicas de estabilización de los suelos, dividiéndose en:

- Métodos de estabilización físicos.
- Métodos de estabilización químicos.

3.1.1 Métodos de estabilización físicos

Los métodos de estabilización física se realizan por medio de la maquinaria adecuada y se realizan más comúnmente mediante compactación y mezclas de suelo.

- **Compactación por impacto:** Esta metodología es relativamente sencilla, consiste principalmente en aplicar energía al suelo mediante una placa apisonadora que golpea el suelo repetidas veces a una alta velocidad. La estabilización por compactación se da con el fin de conseguir un comportamiento apropiado logrando aumentar la resistencia al corte, disminuir la compresibilidad y permeabilidad. Para los suelos en donde irán los cimientos de una estructura se compactan seguido para mejorar sus propiedades de ingeniería.
- **Mezclas de suelo:** La estabilización por mezcla de suelo consiste en juntar dos o más suelos; a estos se les deben realizar ensayos de granulometría, plasticidad, resistencia y permeabilidad antes de ser mezclados con el objetivo de obtener un suelo con las características anteriormente mencionadas pero mejoradas.

3.1.2 Métodos de estabilización químicos

Los métodos de estabilización química hacen referencia a la variación de las propiedades del suelo mediante aditivos químicos como la cal, el cemento, cenizas volantes, cloruro de calcio, etc. Este tipo de estabilizaciones puede realizarse de forma in-situ o directamente se puede realizar la mezcla en la planta en donde se está produciendo el material (Yepes V et al, 2004).

- **Estabilización con Cal:** Para lograr estabilizar un suelo con Cal es esencial tener en cuenta ensayos de laboratorio para definir la cantidad de cal que requiere cada suelo en específico. Una vez es clara la cantidad de cal que requiere el suelo, esta cantidad se vierte y se mezcla con el suelo, se compacta de dos a cuatro horas para que la cal reaccione adecuadamente con el agua y el suelo y se tenga un pH óptimo. Este tipo de estabilización es adecuada para suelos arcillosos, las propiedades de la cal hacen disminuir la plasticidad del suelo y aumentar su resistencia.
- **Estabilización con cloruro de calcio:** Para estabilizar un suelo con cloruro de calcio es importante tener en cuenta primero la granulometría del material ya que la cantidad óptima de cloruro de calcio dependerá de esta. Al realizar el ensayo de granulometría y determinar el porcentaje de cal, el conglomerado de cal aérea se mezcla con el suelo y se compacta mediante vibrocompactadores o compactadores de rodillo. Este método es ideal para suelos constituidos por arcillas y limos ya que impermeabilizan y disminuyen la cantidad de polvo que el material pueda generar.
- **Estabilización con cemento:** Es conveniente para suelos conformados por arenas o gravas finas, el cemento ayuda a aumentar la resistencia y disminuir la plasticidad de los suelos. Para entender mejor como es el proceso constructivo de suelos estabilizados con cemento se profundizará en la técnica soil mixing:

- **Método de estabilización suelo-cemento (Soil Mixing)**

Este método de estabilización es una técnica de mejoramiento del suelo que se basa en mezclar el suelo in-situ con un cementante cambiando las características del suelo a través de su mezclado (Keller, Deep Soil Mixing). Los objetivos de este método de estabilización son el control de asentamientos diferenciales, aumento de la capacidad portante y aumentar la reacción lateral del suelo que está alrededor de las columnas suelo-cemento para encapsular el terreno y mitigar la posible licuefacción del mismo.

Esta técnica tiene distintas ventajas, como:

- Mejora la capacidad portante u resistencia al corte del suelo.
- Es una técnica que no necesita de vibro compactaciones.
- Reduce de asentamientos.
- Estabiliza y homogeneiza el suelo.

- Mejora en procesos de construcción.
- Reduce el tiempo de consolidación.
- Mitiga el riesgo a posible licuefacción.
- Es una solución económica y rápida ya que en el sitio de construcción solo se necesita la maquinaria, el material cementante y el encargado responsable de realizar los sondeos respectivos.
- Reduce el tiempo de consolidación.

El proceso de ejecución de este método es relativamente sencillo, se empieza realizando el sondeo por medio de una mezcladora giratoria la cual, al obtener la profundidad deseada, inicia el proceso de inyección del material cementante, creando así columnas con un diámetro constante en toda su profundidad. Los cementantes y/o aglomerantes comúnmente utilizados son el cemento portland, la cal y la bentonita, éstos reaccionan químicamente con el terreno y el agua, dándole así más resistencia, menor permeabilidad y menor compresibilidad que el terreno original (Keller, Deep Soil Mixing).

Se debe tener en cuenta como se incorporarán los aglomerantes al suelo ya que se pueden inyectar por dos métodos:

Método húmedo: consiste en la inyección de una lechada y es ideal cuando el suelo está constituido por arcillas y granos finos de arena con un bajo porcentaje en su contenido de agua.

Método seco: consiste en la inyección del aglomerante mediante aire comprimido y se adecua más cuando se tiene un suelo blando con un alto porcentaje de humedad.

Se debe tener en cuenta que la disposición de los diferentes tipos de suelo para mezclarse con el material cementante y/o aglomerado dependerá del contenido de agua, resistencia, granulometría y plasticidad del suelo-base el cual se quiere mejorar (Keller, Deep Soil Mixing).

En las Figura 1 de Keller, empresa española contratista geotécnica se puede apreciar cómo se da el proceso constructivo de las columnas suelo-cemento descrito anteriormente.

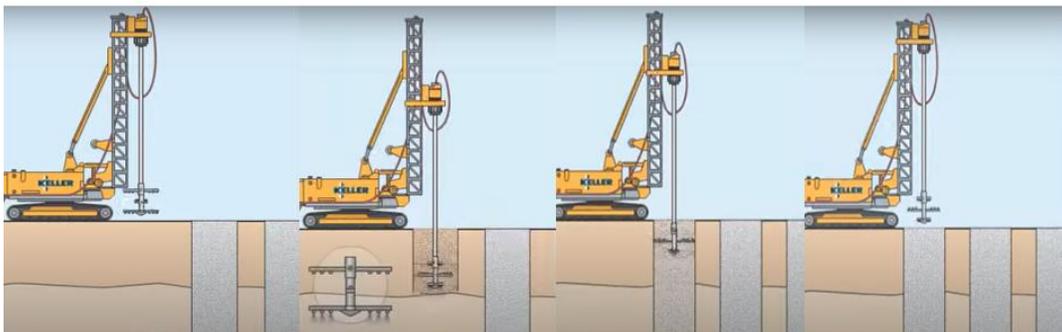


Figura 1 Deep Soil Mixing, Keller. Fuente: <https://www.keller.com.es/experiencia/tecnicas/deep-soil-mixing-dsmm>

3.2 Modelación física en centrífuga geotécnica

La geotecnia es una rama desafiante en la ingeniería ya que existe mucha incertidumbre en cuanto a lo que pasará o no en el terreno. Las posibilidades de reducir las probabilidades de incertidumbre geotécnica a cero son casi nulas, pero existen dos alternativas de modelación para reducir catástrofes, predecir qué pasará con el suelo y evaluar sistemas de estabilización.

Modelar físicamente problemas existentes es de gran ayuda ya que permiten una mejor visualización y entendimiento de los fenómenos que se presentan en el suelo bajo ciertas condiciones.

La utilización de modelos a escala reducida para replicar y predecir ciertos comportamientos de distintas estructuras geotécnicas es una técnica bastante apropiada para observar de forma detallada lo que se explica en la teoría.

Al día de hoy, la técnica de modelación física más utilizada en el mundo de la ingeniería geotécnica es la modelación en las centrifugas geotécnicas, ya que éstas permiten someter un modelo a escala a campos gravitacionales a la misma escala del modelo permitiéndole así una simulación muy acertada de lo que pasa en la vida real; en pocas palabras, en una centrifuga geotécnica se pueden replicar los esfuerzos geo estáticos que actúan en una determinada masa de suelo producidos por su propio peso (Vela et al, 2018).

La modelación física en centrifuga geotécnica tiene un principio el cual se basa en ensayar un modelo a escala $1/N$ de un prototipo de alguna estructura geotécnica en un campo de gravedad modificado en una centrifuga geotécnica teniendo en cuenta que la gravedad aumenta debido al mismo factor geométrico N en relación con el campo de gravedad terrestre normal (denominado $1g$) y gracias a esta relación de la centrifuga con la gravedad (Ng) es posible someter a el modelo a escala a un comportamiento que tendría una estructura real (Madabhushi, 2017). Para entender mejor lo que le pasa al modelo a escala véase la Figura 2.

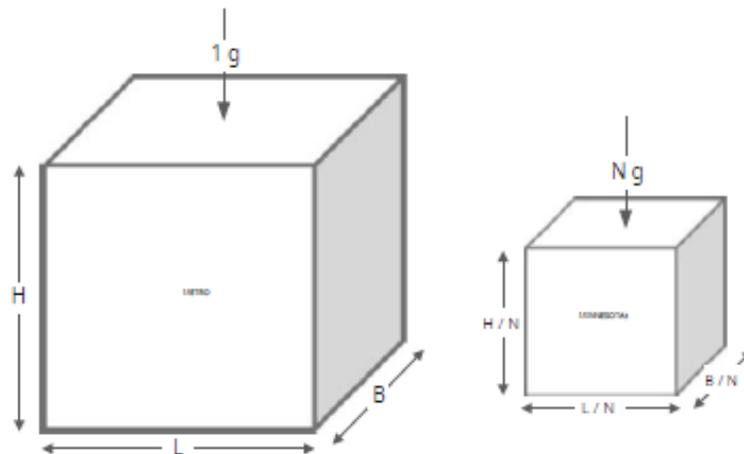


Figura 2 Principio de modelación en centrifugas geotécnicas. Fuente: Madabhushi, 2017.

Madabhushi también plantea unas leyes de escala para recrear estos modelos a pequeña escala, donde N son las gravedades a las que estará sometido el modelo. Véase Tabla 1.

Tabla 1 Leyes de escala para modelación en centrífuga geotécnica. Fuente: Madabhushi, 2017.

	PARÁMETRO	MODELO / PROTOTIPO	UNIDAD
Eventos no dinámicos	Longitud	$1/n$	m
	Área	$1/n^2$	m^2
	Volumen	$1/n^3$	m^3
	Masa	$1/n^3$	kg
	Esfuerzo	1	kPa
	Deformación	1	-
	Fuerza	$1/n^2$	N
	Momento flector	$1/n^3$	N*m
	Trabajo	$1/n^3$	N*m
	Energía	$1/n^3$	J
	Tiempo (consolidación)	$1/n^2$	s
Eventos dinámicos	Tiempo (dinámico)	$1/n$	s
	Frecuencia	n	1/s
	Desplazamiento	$1/n$	m
	Velocidad	1	m/s

La escuela Colombiana de Ingeniería cuenta con una centrífuga geotécnica tipo viga que tiene las siguientes dimensiones y especificaciones (Lozada et al, 2021):

- Relación a la plataforma de 610mm.
- Dos cestas dumper en cada extremo de la viga en donde se encuentran unos contenedores en donde se deposita el suelo.
- Tiene un rango de aceleración entre 10g y 200g. En la aceleración máxima puede soportar una carga máxima de 12 kg en cada canasta.
- Los contenedores en donde van los modelos tienen 17 cm de largo, 10 cm de ancho y 15 cm de alto.
- Cuenta con conexiones electrónicas que tienen una señal de transmisión inalámbrica de 12 sensores con un rango de voltaje de salida entre 500mV y 10V.
- Está equipada con conexiones internas para proveedores de energía, adaptadores, controladores de motor y otros dispositivos externos.
- Los datos de los sensores instalados en la centrífuga se obtienen mediante un programa de adquisición de datos desarrollado en el software Labview.
- El sistema instalado permite adecuar a la centrífuga con diferentes sensores en los modelos geotécnicos para medir diferentes variables como presión de agua intersticial, desplazamiento, temperatura, contenido de agua, aceleración y de más.

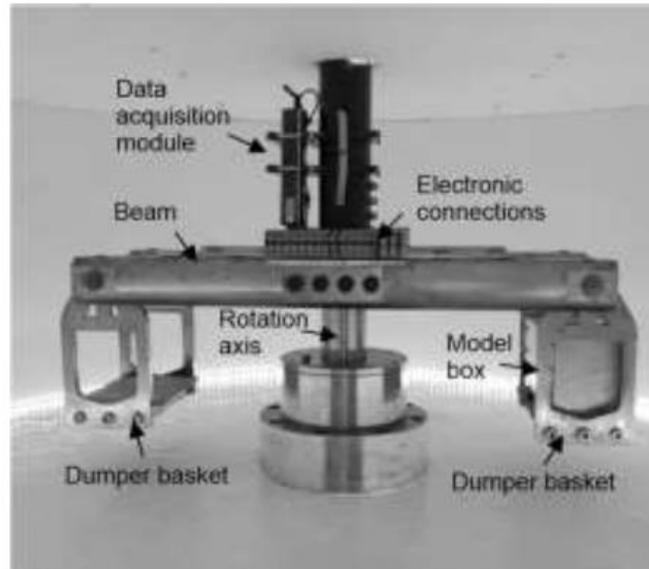


Figura 3 Centrífuga geotécnica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Fuente: Lozada et al, 2021.

Para este trabajo dirigido también se debe tener en cuenta que, como se modelarán suelos utilizando bentonita, caolín o una mezcla de éstos con un alto contenido de agua, se debe tener en cuenta el cómo debe ser la preparación de este tipo de suelo en los modelos físicos.

La preparación de modelos físicos en suelos de grano fino se suele realizar con alto contenido de agua, habitualmente 1.5 veces el límite líquido (Lozada et al, 2021). Con este contenido de agua se asegura la homogeneidad del suelo que se está construyendo. Enseguida, se lleva a cabo un proceso de consolidación que simula un suelo normal consolidado o sobre consolidado. Para llevar a cabo este proceso de consolidación la Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito cuenta con varios equipos consolidómetros con los cuales es posible llevar la muestra al estado de consolidación requerido éste permite la aplicación de pasos de carga de 3 kg a 200 kg con una precisión de $\pm 1,5$ kg. Los resultados de este ensayo de consolidación son sencillos de obtener gracias a que la máquina lleva incorporada un Software que permite recolectar los datos de consolidación.

3.3 Modelación física de suelos mejorados con columnas suelo-cemento

A continuación, se hablarán de cuatro artículos en donde se habla de modelación física con mezclas suelo-cemento.

- **Pruebas en centrífuga dinámica en arcilla blanda con rejillas suelo – cemento:**

Este artículo se centra en el potencial daño que reciben los suelos blandos durante un sismo. Estos daños en este tipo de suelos se pueden reducir con estructuras geotécnicas hechas de mezcla suelo – cemento, estructuras como columnas o rejillas que sirven para darle una mayor estabilidad al suelo. Se realizan pruebas dinámicas en una centrífuga geotécnica en un modelo a escala de un suelo blando reforzado con rejillas hechas de suelo – cemento y otro sin reforzar. Se evaluaron varias proporciones de arcilla, cemento y agua hasta obtener una mezcla manejable. Como resultado final, se obtiene una reducción en los asentamientos del modelo reforzado después de un sismo.

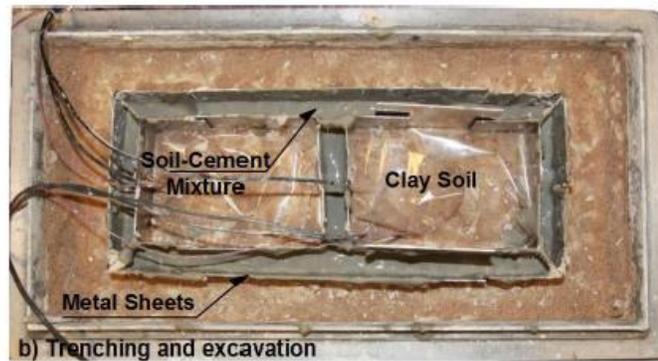


Figura 4 Suelo reforzado con rejillas suelo - cemento. Fuente: Khosravi, et al, 2015

- **Mejoramiento de suelos mediante columnas de suelo-cemento (Investigación experimental):**

Esta investigación experimental abarca una serie de pruebas de modelos con suelo tomado del Río Nilo, estos modelos fueron reforzados con columnas suelo – cemento. Determinado diferentes distribuciones de las columnas y distintas proporciones de mezcla suelo – cemento se ensayan estos modelos reforzados con el único objetivo de medir la resistencia a la compresión de las columnas, concluyendo que a mayor relación agua – cemento dentro de la mezcla suelo-cemento, la resistencia tiende a disminuir.

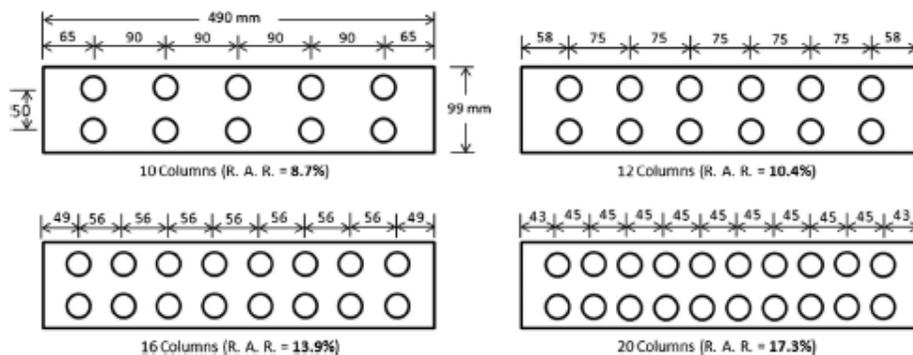


Figura 5 Distribución de columnas suelo - cemento con distintas proporciones de mezcla. Fuente: Farouk, et al, 2013.

- **Comportamiento de suelos blandos mejorados por columnas flotantes de suelo – cemento:**

El artículo tiene como objetivo examinar los mecanismos de falla de las columnas suelo – cemento en un suelo blando. Se realizan diez ensayos de resistencia a la compresión a diferentes cargas a modelos de suelo blando reforzado con columnas suelo – cemento de 24mm de diámetro con 100mm de longitud. Llegan a distintos comportamientos de falla según la carga. En la Figura 6 se puede ver la imagen del ensayo del suelo en donde se marcan las columnas antes y después de uno de estos ensayos.



Figura 6 Comportamiento de falla columnas suelo - cemento. Fuente: Ahmad S, et al, 2016.

- **Ensayo en centrífuga dinámica de un terraplén bajo un suelo licuefactable y columnas suelo – cemento aisladas:**

Se realizó un ensayo en una centrífuga dinámica en un modelo de terraplén colocado sobre una capa de arena saturada reforzada con columnas suelo – cemento. El modelo de terraplén fue sacudido por tres movimientos sísmicos de distintas intensidades con el fin de investigar el desempeño sísmico del terraplén sobre el suelo reforzado.



Figura 7 Columnas suelo - cemento después del ensayo. Fuente: Pourakbar, et al, 2020

4. METODOLOGÍA

Para el estudio de los mecanismos de falla de los terraplenes con y sin refuerzo se realizaron tres modelos de terraplén; el primer modelo sin refuerzo y el segundo y tercer modelo con refuerzo y para esto se siguió la siguiente metodología:

4.1 Modelación física de suelos mejorados con columnas suelo-cemento

- Geometría general del terraplén:

Definición de la geometría de los modelos: para realizar el análisis de imagen se decidió dejar la misma geometría para los tres terraplenes. Véase Figura 8.

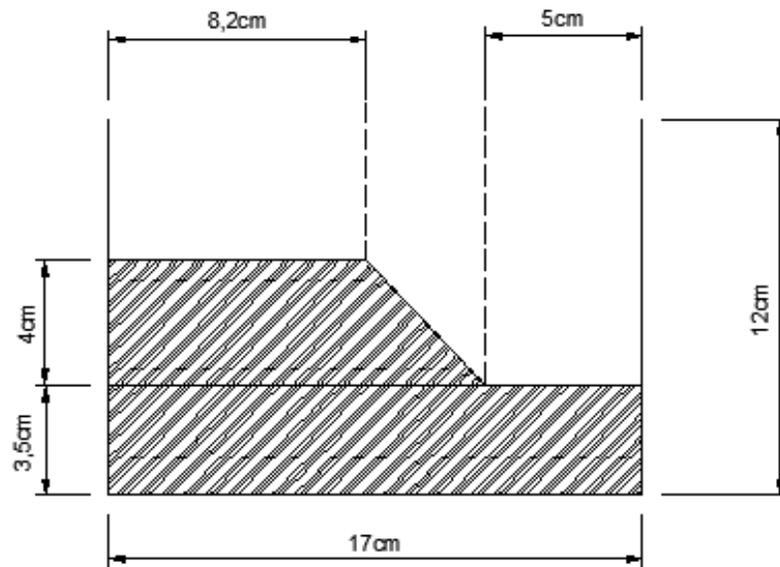


Figura 8 Geometría de los tres modelos. Fuente: Propia.

Definición de la distribución geométrica de las columnas suelo-cemento en los terraplenes con refuerzo: se decidió definir dos configuraciones geométricas de la distribución de las columnas y dejar un diámetro constante de un centímetro; el segundo modelo lleva más columnas que el tercer modelo (doce y nueve columnas respectivamente). Véase Figura 9.

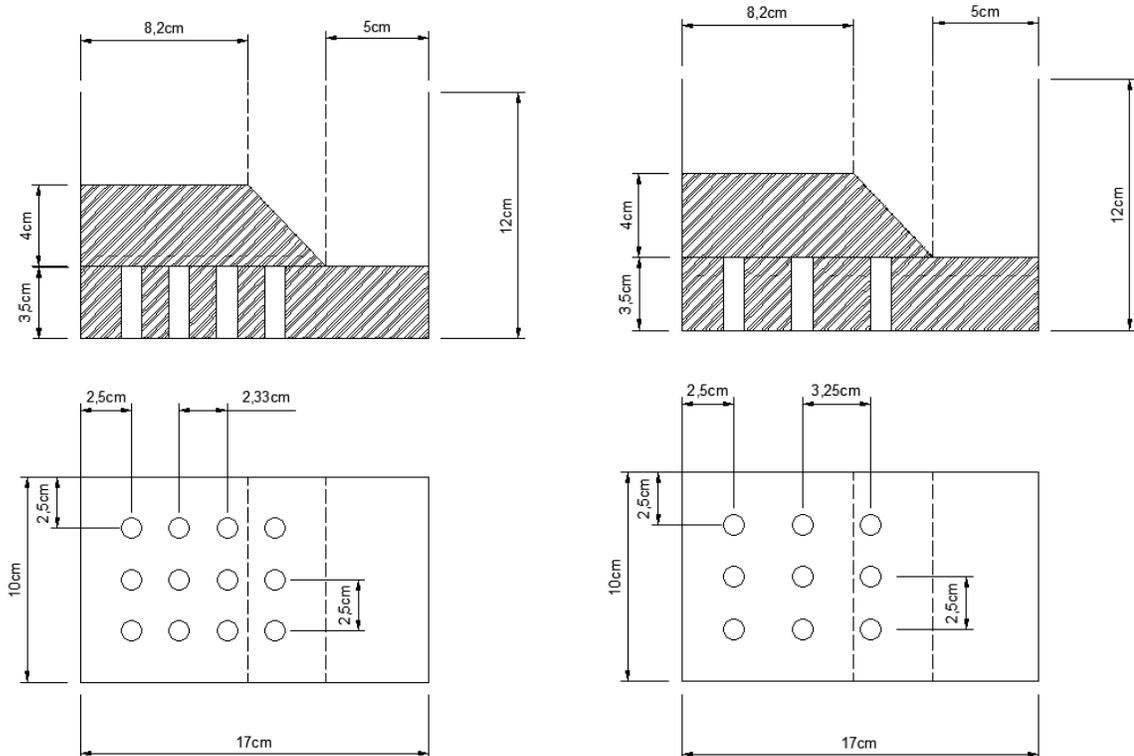


Figura 9 Distribución geométrica de las columnas suelos-cemento para modelo 2 y 3 respectivamente. Fuente: Propia.

4.2 Elección de la mezcla de suelo para los terraplenes y mezcla suelo-cemento para las columnas

- **Mezcla de suelo para los terraplenes:**

Elección de la mezcla de suelo para los tres modelos homogéneos: para la mezcla de suelo de los modelos se decidió utilizar 20% de bentonita y 80% de caolín, con un límite líquido de $LW=150\%$. En total se utilizaron 360g de bentonita, 1440g de caolín y 1800g de agua para la mezcla de cada terraplén.

- **Mezcla suelo – cemento – agua para las columnas:**

Elección la mezcla suelo – cemento – agua: Para escoger esta mezcla, según el estudio de Khosravi, et al, 2015. 2020, se establecen unos porcentajes que sean adecuados y manejables para la construcción de las columnas. Véase Tabla 2, partes por peso.

Tabla 2 Mezcla suelo-cemento.

C : Ar : A		C : Ar : A	
C	Cemento	1.0 : 1.9 : 3.1	
Ar	Arcilla		
A	Agua		

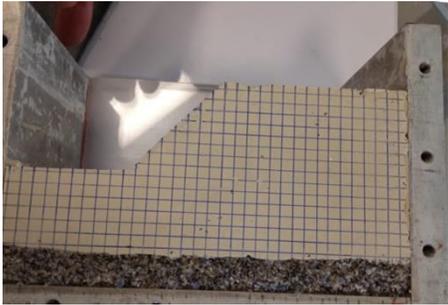
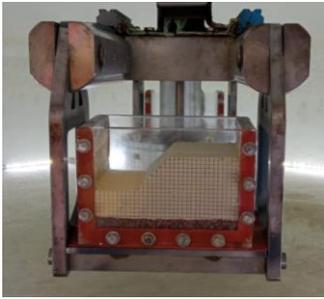
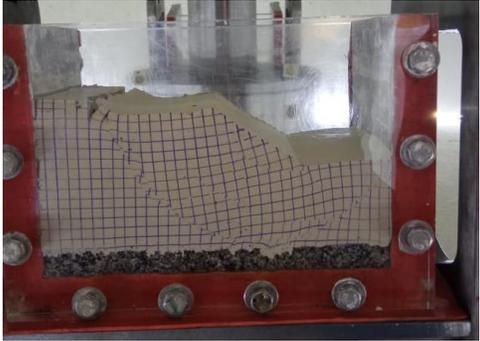
Adicional a esto, se utilizó un 3% de acelerante de concreto para obtener la resistencia máxima de las columnas suelo-cemento a los siete días de haberse fundido.

4.3 Proceso constructivo y ensayo en centrífuga de los modelos

A continuación, se describirá el proceso constructivo de los terraplenes.

- **Modelo 1 – Terraplén sin refuerzo**

<p>A. Mezcla de suelo: Con las cantidades proporcionadas en la metodología se realiza la mezcla de caolín, bentonita y agua.</p>	
<p>B. Contenedor: Rellenar el contenedor de la centrífuga con la mezcla de suelo previamente hecha. Con ayuda de cucharas se llena la caja hasta el tope con la mezcla de suelo.</p>	
<p>C. Consolidación del suelo: Para crear la historia de esfuerzos del suelo se definió un esfuerzo de 25kPa y se aplicó el ensayo de consolidación unidimensional según la norma INV E 151-07 la cual consiste en ir duplicando la carga hasta llegar al esfuerzo deseado. Para aumentar la carga se utilizó el método gráfico de Taylor. El modelo consolidó completamente en cuatro días.</p>	

<p>D. Construcción del terraplén: Una vez se consolida por completo el modelo al esfuerzo requerido se procede a cortar el modelo y darle la forma al terraplén.</p>	
<p>E. Malla: Para realizar el análisis de imagen se trazó una malla con tinta china en los lados del modelo.</p>	
<p>F. Ensayo en la centrífuga: Se coloca el modelo dentro de la canasta de la centrífuga y se empieza con el vuelo. En este caso el modelo se ensayó a 100g durante diez minutos.</p>	
<p>G. Fotografiar el modelo: Finalmente, después del vuelo en la centrífuga se debe fotografiar el modelo para realizar el análisis.</p>	

- **Modelo 2 – Terraplén con refuerzo**

Este segundo modelo se llevó a cabo en dos etapas; la primera etapa constituye la construcción del suelo-base reforzado y la construcción de las columnas; la segunda etapa abarca la construcción del terraplén y el ensayo en la centrífuga geotécnica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

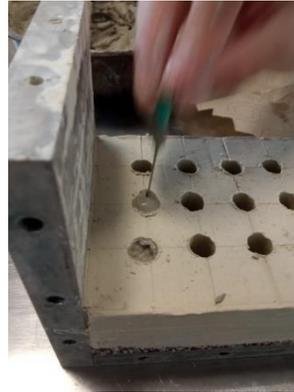
El proceso constructivo por etapas de este terraplén se describirá a continuación con una secuencia de imágenes.

- **Etapas 1**

<p>A. Mezcla de suelo: Con las cantidades proporcionadas en la metodología se realiza la mezcla de caolín, bentonita y agua.</p>	
<p>B. Contenedor: Rellenar el contenedor de la centrífuga con la mezcla de suelo previamente hecha. Con ayuda de cucharas se llena la caja hasta el tope con la mezcla de suelo.</p>	
<p>C. Consolidación del suelo: Para crear la historia de esfuerzos del suelo se definió un esfuerzo de 25kPa y se aplicó el ensayo de consolidación unidimensional según la norma INV E 151-07 la cual consiste en ir duplicando la carga hasta llegar al esfuerzo deseado. Para aumentar la carga se utilizó el método gráfico de Taylor. El modelo consolidó completamente en cuatro días.</p>	

<p>D. Distribución de las columnas: Una vez consolidada el suelo base se traza un mallado para construir las columnas suelo-cemento en donde irá después la construcción del terraplén.</p>	
<p>E. Perforaciones: Una vez marcada la posición de las columnas se procede a realizar las perforaciones. Las perforaciones realizaron con una broca de un centímetro de diámetro.</p>	
<p>F. Mezcla suelo-cemento: Con la relación de la Tabla 2 se hace la mezcla para las columnas suelo cemento.</p>	
<p>G. Vertimiento de la mezcla suelo-cemento: Con las perforaciones ya hechas se procede a rellenarlas. Para este proceso se utilizó una jeringa de un centímetro de diámetro.</p>	

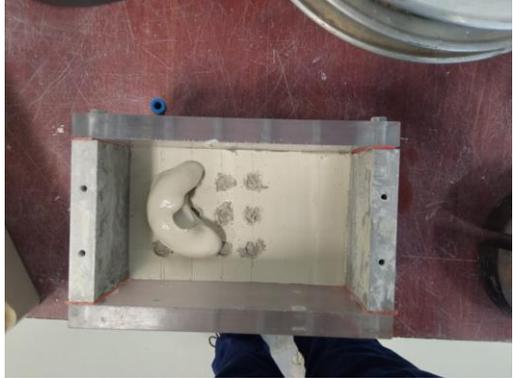
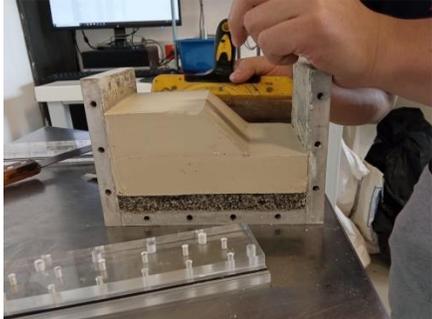
H. Vacíos: Para evitar que las columnas tengan vacíos con una aguja se procede a chuzar la mezcla.



I. Curado: Una vez se tienen las columnas hechas se procede a dejar el modelo en un proceso de curado a temperatura ambiente. Con 3% de acelerante de concreto en la mezcla las columnas alcanzaron su resistencia máxima en siete días.



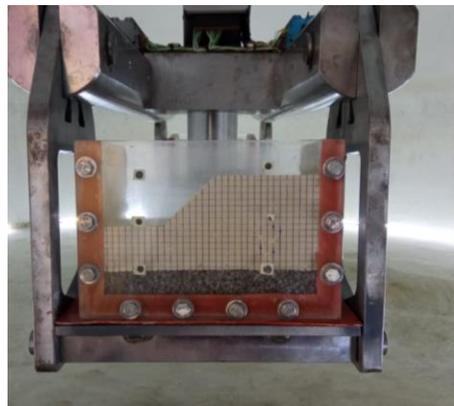
- **Etapa 2**

<p>A. Contenedor: Después de siete días se llena el contenedor con la mezcla de suelo previamente hecha para conseguir la altura total del terraplén.</p>	
<p>B. Consolidación del suelo: Para crear la historia de esfuerzos del suelo se definió un esfuerzo de 25kPa y se aplicó el ensayo de consolidación unidimensional según la norma INV E 151-07 la cual consiste en ir duplicando la carga hasta llegar al esfuerzo deseado. Para aumentar la carga se utilizó el método gráfico de Taylor. El modelo consolidó completamente en cuatro días alcanzando la altura total mostrada en la Figura 4.</p>	
<p>C. Construcción del terraplén: Una vez se consolida por completo el modelo al esfuerzo requerido se procede a cortar el modelo y darle la forma al terraplén.</p>	

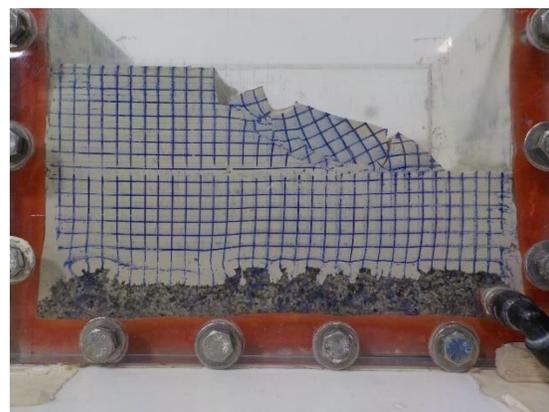
D. Malla: Para realizar el análisis de imagen se trazó una malla con tinta china en los lados del modelo.



E. Ensayo en la centrífuga: Se coloca el modelo dentro de la canasta de la centrífuga y se empieza con el vuelo. El modelo se ensayó a 100g durante diez minutos.



F. Fotografiar el modelo: Finalmente, después del vuelo en la centrífuga se debe fotografiar el modelo para realizar el análisis.



4.4 Caracterización de la resistencia de la mezcla suelo – cemento

Se realizó el ensayo de resistencia a la compresión, usando cubos de cincuenta milímetros de lado siguiendo el libro de prácticas de laboratorio de materiales para obras de ingeniería civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Para este ensayo se utilizó la misma mezcla suelo-cemento con acelerante descrita previamente en la elaboración de las columnas. Sin embargo, como este ensayo es específicamente para mortero hidráulico y no para mezcla suelo-cemento, se evaluaron dos condiciones de curado, la primera con dos especímenes curados siete días en agua y la segunda con un espécimen curado siete días a temperatura ambiente. Los cubos fueron sometidos a una carga de compresión hasta alcanzar la falla. Como se puede observar en la Figura 11, las grietas observadas para las dos condiciones de curado se encuentran dentro de los modos de falla aceptables según el libro de prácticas de materiales mencionado anteriormente.



Figura 10 Cubos de mezcla suelo-cemento. Fuente: Propia.

Curado a temperatura ambiente



Curado en agua



Figura 11 Fallas de los cubos de mezcla suelo-cemento. Fuente: Propia.

Con los datos obtenidos se procede a calcular la resistencia de los cubos con mezcla suelo – cemento.

- **Cubos de suelo-cemento curados siete días en agua:**

Se fallaron dos cubos de la mezcla a los siete días, con 3% de acelerante para lograr su resistencia máxima, dando un resultado de 363.12KPa.

$$f'_{cp7} = \frac{916.91N}{(50.3mm \times 50.2mm)}$$

$$f'_{cp7} = 0.36312MPa$$

$$f'_{cp7} = 363.12KPa$$

- **Cubos de suelo-cemento curados siete días en temperatura ambiente:**

Se falló un cubo de la mezcla a los siete días, con 3% de acelerante para lograr su resistencia máxima, dando un resultado de 578.47KPa.

$$f'_{cp7} = \frac{1431.77N}{(49.7mm \times 4.98mm)}$$

$$f'_{cp7} = 0.57847MPa$$

$$f'_{cp7} = 578.47KPa$$

La resistencia obtenida del espécimen curado a temperatura ambiente (578.47kPa) se encuentra dentro de los rangos de valores esperados para la mezcla utilizada (400kPa – 700kPa) sacada del artículo Khosravi, et al, 2015, mientras que la muestra curada en agua desarrolló una menor resistencia (363.12kPa) estado fuera de los rangos esperados. Cabe resaltar que el modo de curado de las columnas suelo-cemento se realizó por siete días a temperatura ambiente, por lo tanto, la resistencia de las columnas alcanzó un esfuerzo de 578.48kPa.

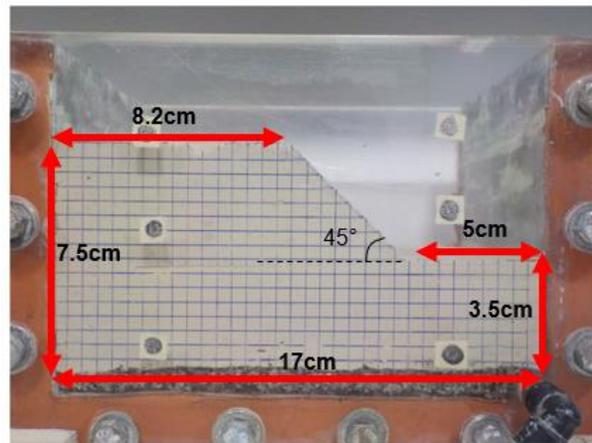
4.5 Análisis de imagen de los modelos

Con las fotografías de los modelos antes y después del ensayo, se realizó un análisis de imagen.

- Modelo 1 – Terraplén sin refuerzo

TERRAPLÉN ANTES DEL VUELO

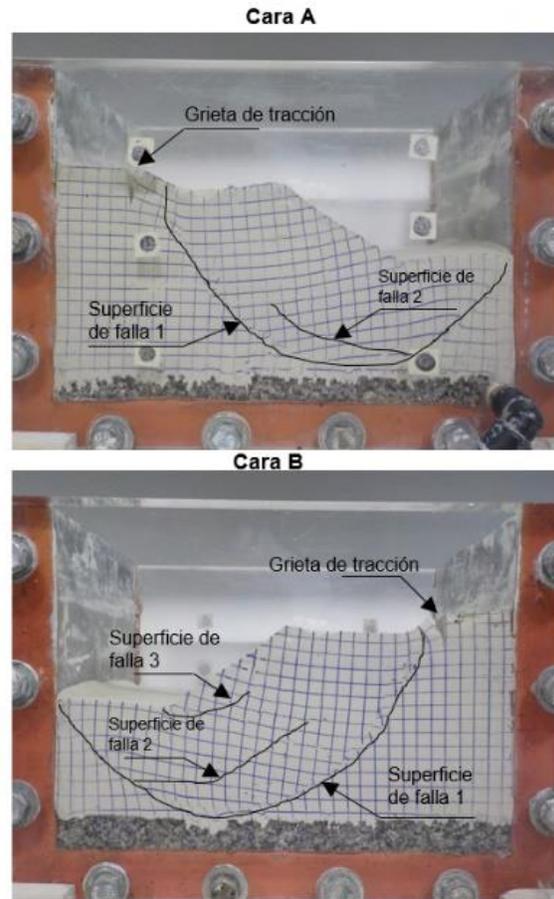
Antes de realizar el vuelo en la centrifuga geotécnica se fotografió el modelo para realizar el análisis de imágenes antes y después del ensayo.



TERRAPLÉN DESPUÉS DEL VUELO

Después de volar el modelo en la centrifuga geotécnica a 100g durante diez minutos es posible identificar tres superficies de falla. Gracias a la malla de trazado, en cara A del modelo se observan claramente dos superficies de falla tipo circular, mientras que, en la cara B se detalla mucho mejor la superficie de falla 3. Esto evidencia una asimetría en la falla.

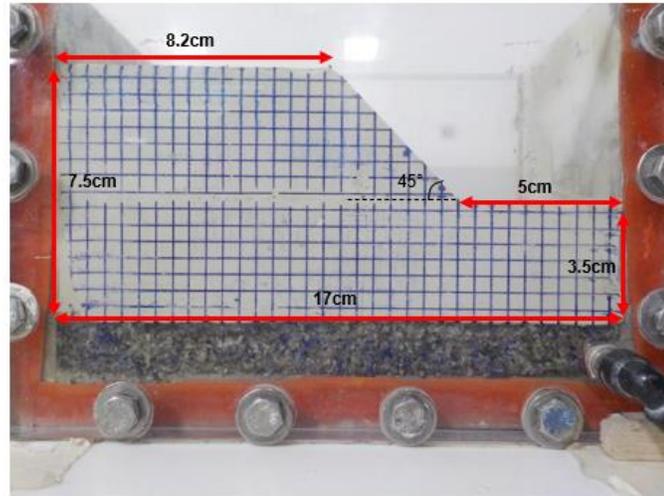
Solo se evidencia una grieta de tracción en la falla el cual mide 1.45cm de profundidad.



- **Modelo dos – Terraplén con refuerzo**

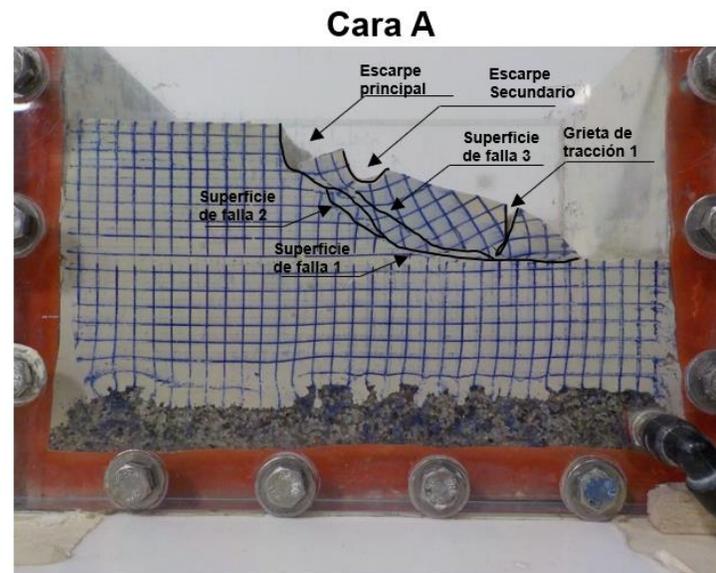
TERRAPLÉN ANTES DEL VUELO

Antes de realizar el vuelo en la centrifuga geotécnica se fotografió el modelo para realizar el análisis de imágenes antes y después del ensayo.

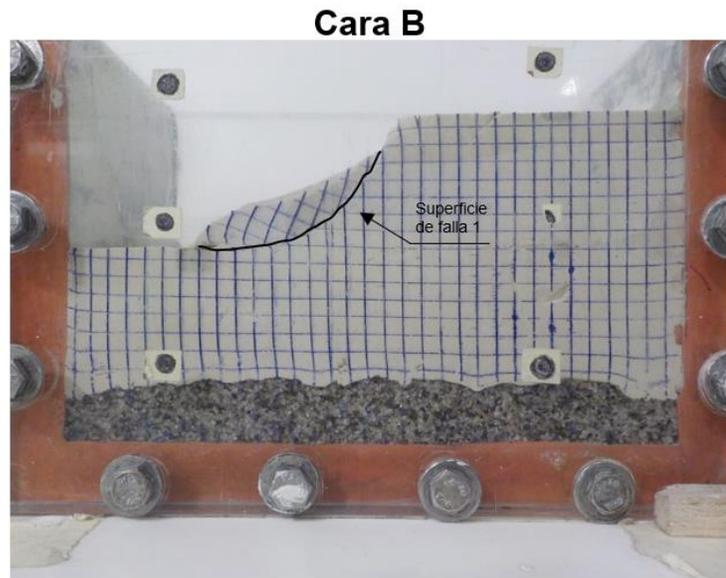


TERRAPLÉN DESPUÉS DEL VUELO

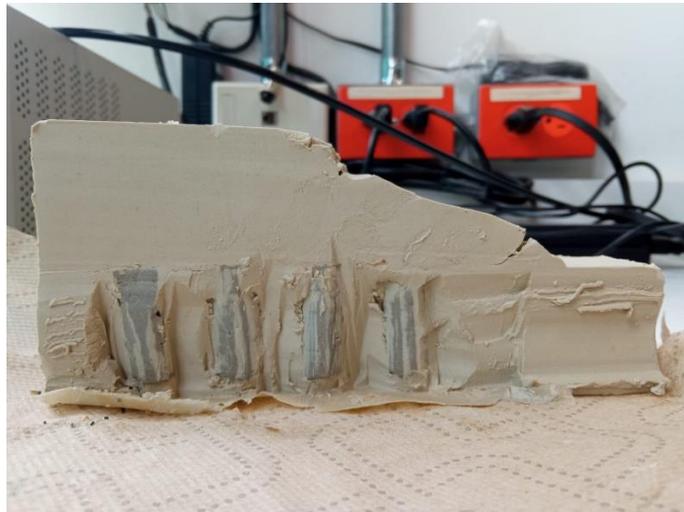
Después del vuelo la cara A del modelo presenta un mecanismo de falla más drástico que por la cara B lo que evidencia una asimetría en la falla. En esta cara se observan tres superficies de falla, una grieta de tracción y dos escarpes. Las superficies de falla son de tipo circular.



Debido a la asimetría en la falla solo se evidencia una superficie de falla tipo circular en la cara B del modelo.



Se realizó un corte transversal para observar que efecto tuvo el vuelo sobre las columnas suelo-cemento. Se observa una ligera inclinación que podría estar relacionada con el método constructivo utilizado y no necesariamente con las gravedades aplicadas durante el ensayo.



- **Comparación de la cara A de los dos modelos**

A modo de cierre, se evidencia que las columnas suelo-cemento utilizadas como refuerzo para el suelo bajo el terraplén funcionaron exitosamente. En la Figura 12 se evidencia que las superficies de falla del modelo sin refuerzo atraviesan tanto el terraplén como el suelo base y las superficies de falla del modelo con refuerzo solo atraviesan el terraplén, dando como resultado un suelo estabilizado correctamente.

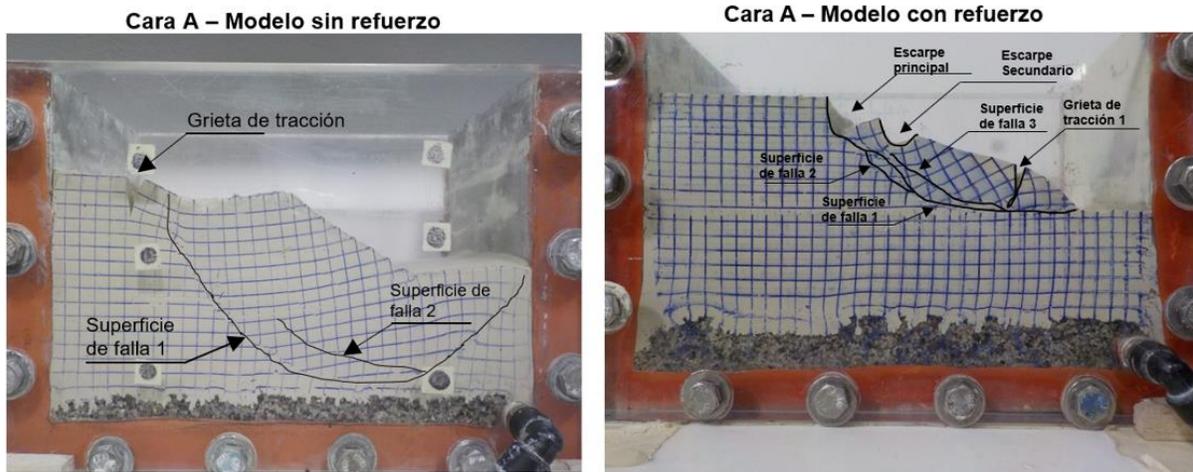


Figura 12 Cara A de los modelos sin y con refuerzo. Fuente: Propia.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se determinó una metodología para construir un suelo reforzado con columnas suelo-cemento.
- Teniendo en cuenta las condiciones de frontera se logró establecer una distribución geométrica adecuada de las columnas suelo – cemento.
- De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos de compresión se puede concluir que los cubos sumergidos en agua desarrollan una menor resistencia que los cubos curados a temperatura ambiente. Cabe resaltar que este último método fue el utilizado en el curado de las columnas suelo-cemento obteniendo una resistencia de 578.47kPa.
- Del análisis de imagen se concluye que para el modelo sin refuerzo se presenta una falla rotacional de un radio aproximado de 5.39cm. Esta falla viaja tanto por el terraplén como por el suelo base que lo sostiene.
- Se observa que el modelo reforzado presenta también una falla rotacional, pero ésta solamente viaja por terraplén dejando el suelo base intacto. Se obtienen superficies de falla con un radio aproximado de 2.31cm.
- A partir de la comparación de los análisis de imagen se ve un claro mejoramiento de la arcilla blanda en el suelo base puesto que se observa una notoria disminución del recorrido de las superficies de falla, ya que en el modelo sin refuerzo falló tanto el terraplén como el suelo base, mientras que en el modelo con refuerzo falló únicamente el terraplén.
- Se recomienda el uso de un taladro de árbol para garantizar una mayor verticalidad en el proceso constructivo, ya que este cuenta con un soporte que asegura una perforación totalmente vertical.
- Se sugiere que se prueben diferentes relaciones de mezcla suelo – cemento – agua junto con el aditivo para establecer proporciones que hagan que la mezcla sea mucho más líquida y manejable si se desea construir columnas de menor diámetro.

BIBLIOGRAFÍA

Yepes V et al, 2004. *Temas de procedimientos de construcción. Mejora de terrenos.* Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia. Ref. 2004.844.

Keller, Deep Soil Mixing. KELLER. *Deep Soil Mixing (DMS).* [Deep soil mixing \(DSM\) | Keller Cimentaciones](#)

Vela et al, 2018. Camilo Andrés Fino Vela CT, Diego Andrés Lozano CT, Juan Carlos Ruge C (2018, junio). Aspectos que condicionan las modelaciones físicas en la predicción del comportamiento de estructuras geotécnicas reales. *Revista Brújula, Semilleros de Investigación*, pp. 35-42.

Madabhushi, 2017. G. Madabhushi, *Centrifuge Modelling for Civil Engineers.* CRC Press, 2017.

Lozada et al, 2021. Catalina Lozada, Lina Ximena Garzón, Sandra Ximena Campagnoli (2021, julio). Geotechnical centrifuge applications in the teaching of applied soil mechanics. *Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.*

Farouk, et al, 2013. Ahmed Farouk, Marawam M. Shahien (2013, agosto). Ground improvement using soil-cement columns. Experimental investigation. *Structural Engineering Department, Faculty of Engineering, Tanta University, Egypt.*

Coldwell, et al, 2020. Eddie Coldwell, Shahabeddin Zaregarizi, Mohammad Khosravi, Steven Perkins, Jack Montgomery (2020, febrero). Stability Analysis of an Embankment Supported by Spatially Variable Soil-Cement Columns. *Dept. of Civil Engineering, Montana State University and Auburn University.*

Khosravi, et al, 2015. Mohammad Khosravi, Shuji Tamura, Ross W. Boulanger, Daniel W. Wilson, Guney Olgun, Deepak Rayamajhi, Yongzhi Wang (2015, marzo). Dynamic Centrifuge Test son Soft Clay Reinforced by Soil-Cement Grids. *Dep. of Civil Engineering, University of California, Oregon State University, Virginia Tech and Tokyo Institute of Technology.*

Pourakbar, et al, 2020. Mehran Pourakbar, Shahabeddin Zaregarizi, Mohammad Khosravi (2020, septiembre). Dynamic Centrifuge Test o fan Embankment Underlain a Liquifiable Soil and Isolated Soil-Cement Columns. *Dep. of Civil Engineering, Montana State University and Amirkabir University of Technology.*

Ahmad S, et al, 2016. Ahmad Safuan A. Rashid, Ahmad Beng Hong Kueh, Hisham Mohamad (2016, diciembre). Behaviour of soft soil improved by floating soil-cement columns. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, pp. 95-116.

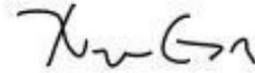
Rachan, et al, 2012. Runglawan Rachan, Suksun Horpibulsuk, Apichat Suddeepong (2012, noviembre). *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, pp. 201-215.

Molano Camargo, M y Torres Castellanos, N. (2017). *Prácticas de laboratorio de materiales para obras de ingeniería civil.* Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Instituto Nacional de vías. (2013). *Consolidación unidimensional de los suelos.* (INVE-151-13).



Firma del Estudiante



Firma del Director del Trabajo Dirigido